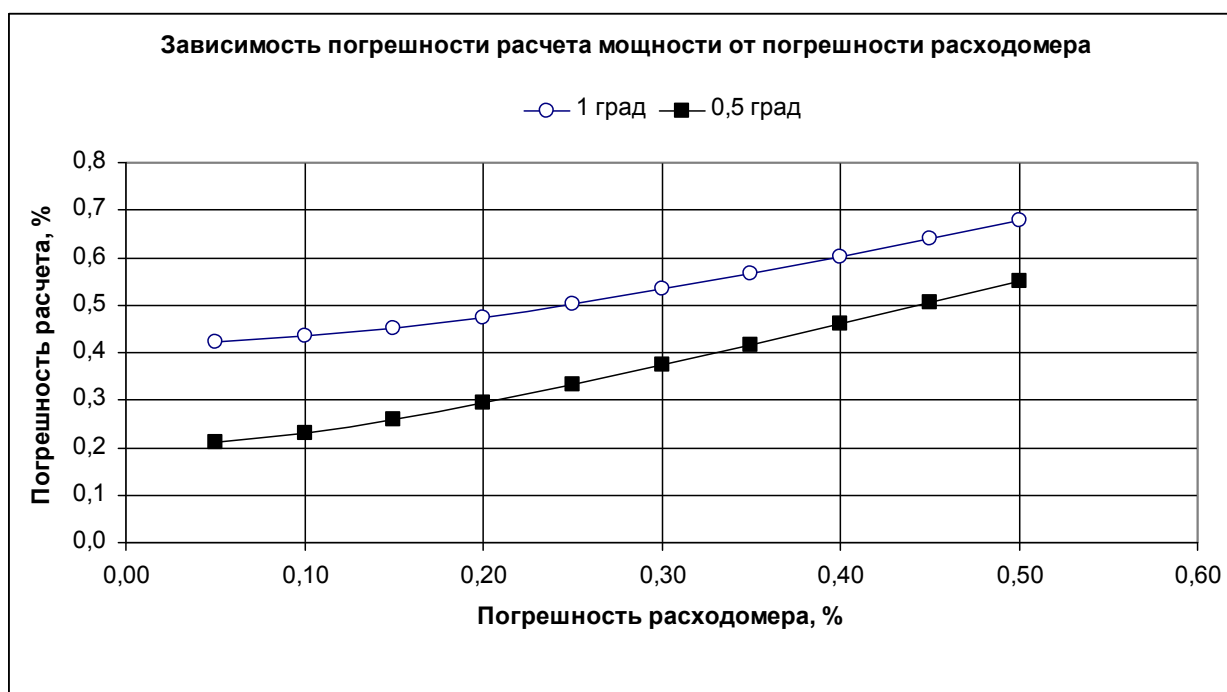


## РАСХОДОМЕР ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ ДЛЯ АЭС

С.Н. Ещенко, А.Ю. Ефремов, О.Г. Пиядов

### Введение.

Задача снижения неопределенности расчета мощности ядерного реактора Атомной Электростанции (АЭС) является актуальной в связи с возможностью повышения мощности реактора на несколько процентов при сохранении вероятности безопасной работы. Поскольку расчет тепловой мощности ядерного реактора проводят по тепловому контуру, в котором вырабатывается водяной пар, проблема снижения неопределенности расчета мощности сводится к погрешности определения массового расхода питательной воды в контуре. Выполненная экспертная оценка вклада точности измерения объемного расхода питательной воды в точность расчета тепловой мощности реактора БН-600 по параметрам петель третьего контура дает такие результаты (рисунок 1).



**Рис. 1. Погрешность расчета тепловой мощности реактора.**

В качестве параметра - точность измерения температуры теплоносителя в теплофикационном контуре АЭС.

Штатными средствами измерения расхода питательной воды являются расходомеры, работающие на методе переменного перепада давления, на стандартных сужающих устройствах. В рабочих условиях измерения относительная погрешность определения массового расхода питательной воды может составлять 3 процента и больше в достаточно узком динамическом диапазоне измерения. Поэтому обеспечение снижения указанной погрешности до уровня 0.5 процентов приводит к значимому экономическому эффекту.

Понимая актуальность задачи, руководство Белоярской АЭС (БАЭС) сформулировало ряд технических требований к расходомеру питательной воды высокой точности.

1. Характеристика измеряемой среды:

- рабочая среда: питательная вода по СО 153-34.20.501-2003;
- рабочие параметры питательной воды третьего контура энергоблока БН-600:
  - Паспортные регистрационные:  $P_{\text{раб}} = 179 \text{ кгс/см}^2$ ,  $T_{\text{раб.1}} = 260^\circ\text{C}$ .

$$P_{\text{раб}} = 179 \text{ кгс/см}^2, \quad T_{\text{раб.2}} = 160^\circ\text{C}.$$

- Расход питательной воды, м<sup>3</sup>/ч : от 20 до 500

2. Характеристика трубопровода:

- материал: сталь 15 ГС;
- наружный диаметр и толщина стенки, мм: Ø219x16;

3. Выходной сигнал преобразователя:

Выходные сигналы преобразователя - линейно-изменяющийся ток  $4 \div 20$  мА при сопротивлении нагрузки не более 500 Ом и цифровой эквивалент расхода по интерфейсу RS-485 с протоколом информационного обмена - шина MODBUS. Нулевому расходу соответствует 4 мА, расходу 500 м<sup>3</sup>/ч соответствует 20 мА.

4. Конструктивные требования.

На корпус первичного преобразователя расходомера распространяются ПУБЭ АЭУ ПН АЭ Г-7-008-89, группа С, класс безопасности - ЗНЗ по ОПБ-88/97. Класс безопасности вторичного преобразователя расходомера - 4Н. Категория сейсмостойкости трубопровода I по НП-031-01. Основные детали корпуса первичного преобразователя должны изготавливаться из материалов, указанных в ПУБЭ АЭУ или применение этих материалов должно быть допущено в соответствии с ПУБЭ АЭУ. Присоединение расходомера к трубопроводу должно быть на сварке. Разделка кромок корпуса расходомера под сварку с трубой Ø219x16, тип шва 1-24-2 (С-24-2) ПН АЭ Г-7-009-89.

5. Требования к метрологическому обеспечению:

Расходомеры должны быть внесены в ГОСРЕЕСТР средств измерений РФ.

Должна быть сертифицированная методика калибровки, а, в случае необходимости, - оборудование и аппаратура для бездемонтажной поверки на объекте (без демонтажа первичного преобразователя). Межповерочный интервал при бездемонтажной методике должен составлять 1 год.

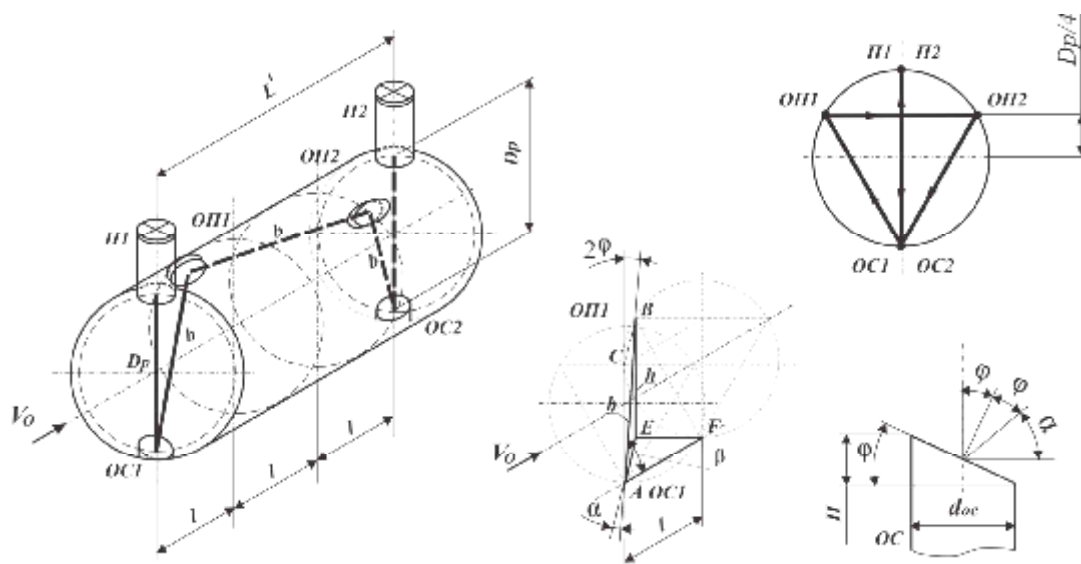
Предел допускаемой относительной погрешности измерения объемного расхода в диапазоне 270-500 м<sup>3</sup>/ч при давлении 100-179 кгс/см<sup>2</sup> и температурах от 160 до 260°С при первичной поверке должен быть  $\pm 0,5\%$  и может быть определен расчетным способом.

При бездемонтажной поверке в условиях эксплуатации относительная погрешность не более  $\pm 1,0\%$ .

### Разработка расходомера.

В основе работы расходомера лежит ультразвуковой, времяпролетный метод, использующий зондирование в направлении потока контролируемой среды и против него.

Зондирование ультразвуковыми импульсными колебаниями осуществляется с помощью двух обратимых, приемопередающих пьезопреобразователей, двух скошенных отражателей и двух плоских отражателей по пространственной “зигзагообразной” траектории. Вид “зигзагообразной” траектории, а также основные расчетные соотношения в зависимости от геометрии проточной полости приведены на рисунке 2.

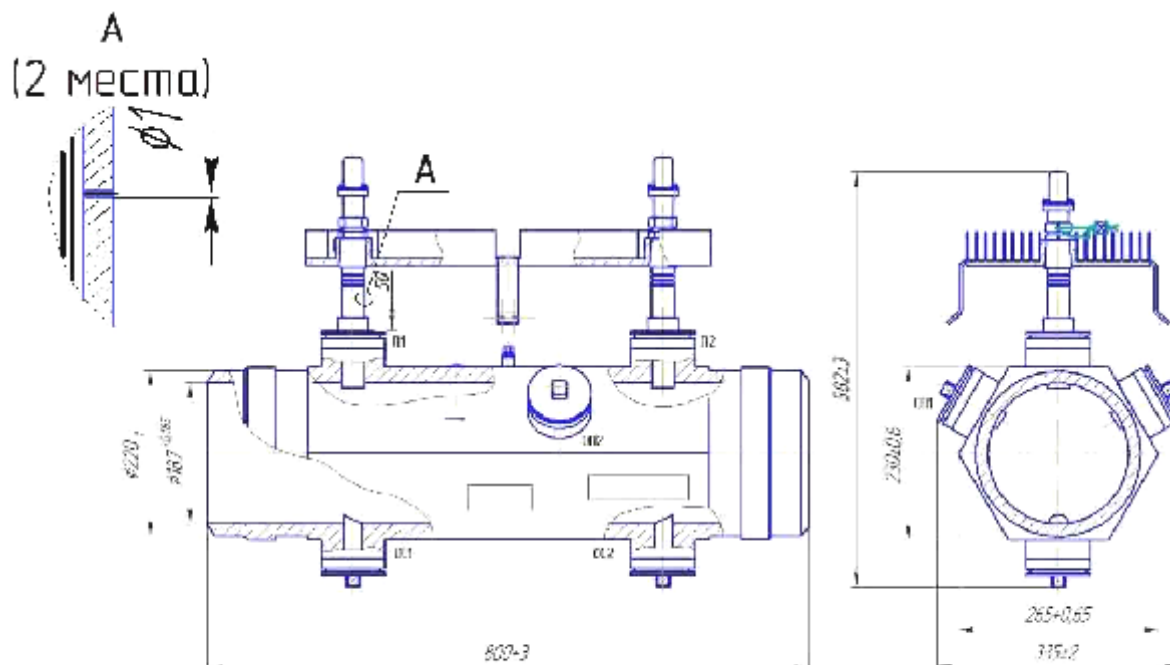


*П1, П2 - первый и второй пьезопреобразователи;  
 ОС1, ОС2 - отражатели скошенные;  
 ОП1, ОП2 - отражатели плоские*

**Рис. 2. Проточная полость и траектория зондирования.**

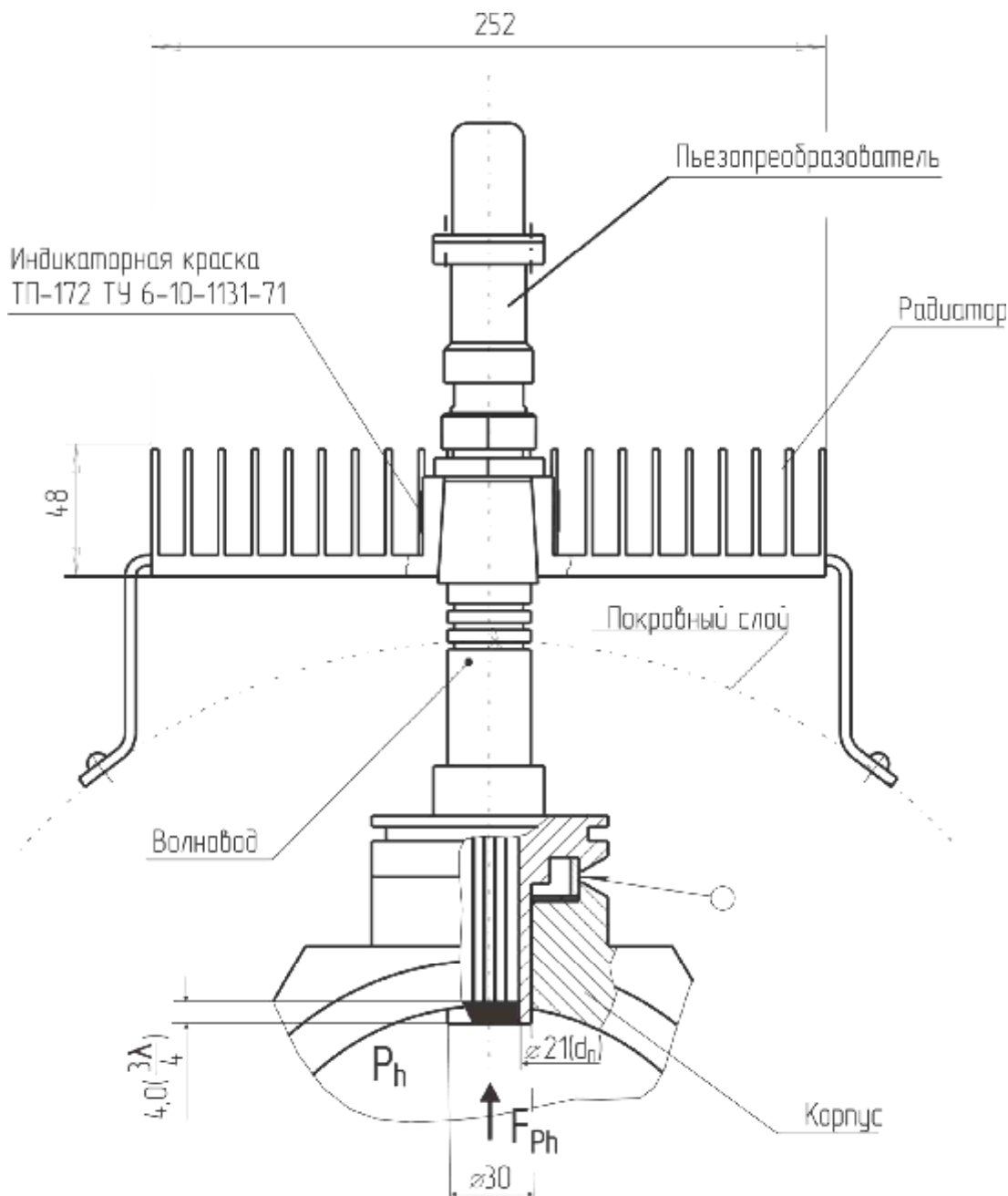
Траектория зондирования состоит из пяти лучей, два из которых – пассивные, перпендикулярные вектору осредненной скорости потока  $V_0$ , а остальные три луча образуют с ней угол  $\beta$ . В первых двух лучах не происходит процесса измерения скорости потока: вектор скорости звука ортогонален вектору скорости потока. Три из пяти лучей, в которых осуществляется измерение, представляют собой наклонные среднерадисные хорды: проекции на поперечное сечение проточной полости пересекают точку  $D_p/4$ . Особенность такой траектории при измерении – на порядок более слабая зависимость от профиля скоростей по сравнению с наклонным диаметром, изменения гидродинамического коэффициента во всем промышленном диапазоне чисел  $Re$  (для нашего случая значения чисел  $Re$  лежат в диапазоне от  $0,21 \cdot 10^6$  до  $7,4 \cdot 10^6$ ) не превышают  $\pm 0,5\%$ .

В рамках требований заказчика об использовании материала корпуса расходомера, совпадающего с материалом трубопроводов теплофикационного контура, корпус расходомера выполнен из поковки из стали марки 15ГС и имеет измерительную и присоединительные части. Поскольку требования к измерительному участку расходомера содержат положение об исключении любых разъемных соединений, наружная поверхность измерительной части ПП20 выполняется в виде шестигранника, на стороны которого крепятся волноводы и отражатели, с помощью сварки. Внутренний диаметр цилиндрического канала соответствует диаметру условного прохода 200 мм. Общий вид корпуса расходомера приведен на рисунке 3.



**Рис. 3. Корпус первичного преобразователя расходомера «ПРАМЕР-517Р».**

В качестве чувствительного элемента пьезопреобразователя использовали пьезоактивный материал APC-850 в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 1.5 мм. Поскольку рабочая температура измеряемой среды (260 °С) значительно превышает максимальную рабочую температуру пьезоматериала (160°С), проведен комплекс работ по преодолению этой технической трудности. Решение было найдено в виде использования специального дистанцирующего устройства - волновода, обеспечивающего 2 функции: тепловую развязку пьезокерамики от высокотемпературной среды, находящейся под высоким давлением, и доставку без искажения зондирующих ультразвуковых колебаний от пьезопреобразователя через слой теплоизоляции и корпус расходомера в проточную часть и обратно. Внешний вид волновода приведен на рисунке 4. Волноводный канал (волновод) представляет собой полый цилиндр из стали марки 15ГС, с размещенными внутри тягами из проволоки, волновод снабжен посадочными местами для радиатора и пьезопреобразователя. Внешняя поверхность цилиндра снабжена тремя кольцевыми проточками для предотвращения распространения УЗК по корпусу волновода (путь “короткого замыкания”).



**Рис. 4. Узел крепления волновода к корпусу расходомера.**

Алюминиевый радиатор, смонтированный на конусную часть волновода, обеспечивает дополнительное рассеивание тепла для снижения температуры наружной стороны волновода до заданного уровня с целью обеспечения долговременной работы пьезоматериала и сохранению акустического контакта между поверхностями волновода и пьезопреобразователя.

Тепловой контакт радиаторов с волноводами осуществляется через слой той же смазки, которая обладает повышенной стойкостью к температуре и теплопроводностью.

Ориентация лучей УЗК в проточной полости осуществляется с помощью скошенных ОС1 и ОС2 и плоских ОП1 и ОП2 отражателей, располагаемых в плоскостях поперечного сечения. Отражатели и волноводы присоединяются к корпусу на сварке после предварительной юстировки их пространственного положения.

Конструкция пьезопреобразователей – съемная, позволяющая производить их замену, в случае необходимости, при эксплуатации.

Электронный блок вторичного преобразователя предназначен для измерений временных интервалов, вычислений объемного расхода в рабочем режиме и по алгоритмам имитации расхода, а также преобразования расхода в токовый и цифровой сигналы.

Алгоритмы измерения и обработки ультразвуковых колебаний содержат ряд уникальных технических решений и обеспечивают, в комплексе с первичным преобразователем, заданные значения по точности и диапазону измерения объемного расхода при высоких значениях давления и температуры питательной воды.

Конструктивно электронный блок вторичного преобразователя выполнен в немагнитном металлическом корпусе из алюминиевого материала, имеющего два крепежных элемента для установки на стену.

Для передачи возбуждающих и приемных ультразвуковых (УЗ) сигналов от первичного преобразователя к электронному блоку применяется кабель связи КС.

Внешний вид электронного блока вторичного прибора расходомера приведен на рисунке 5.

### **Изготовление расходомеров.**

Поскольку класс безопасности первичного преобразователя в технических требованиях определен как ЗНЗ, то изготовление расходомеров по разработанной конструкторской документации мы вели в соответствии с «требованиями, предъявляемыми к поставке Продукции, относящейся к важным для безопасности элементам ОИАЭ 1,2 и 3 классов безопасности».

Требования включают в себя целый комплекс мероприятий, обеспечивающих на выходе из производства должный уровень качества продукции.

Все перечислять не имеет смысла, но для примера, можно остановиться на основных требованиях.

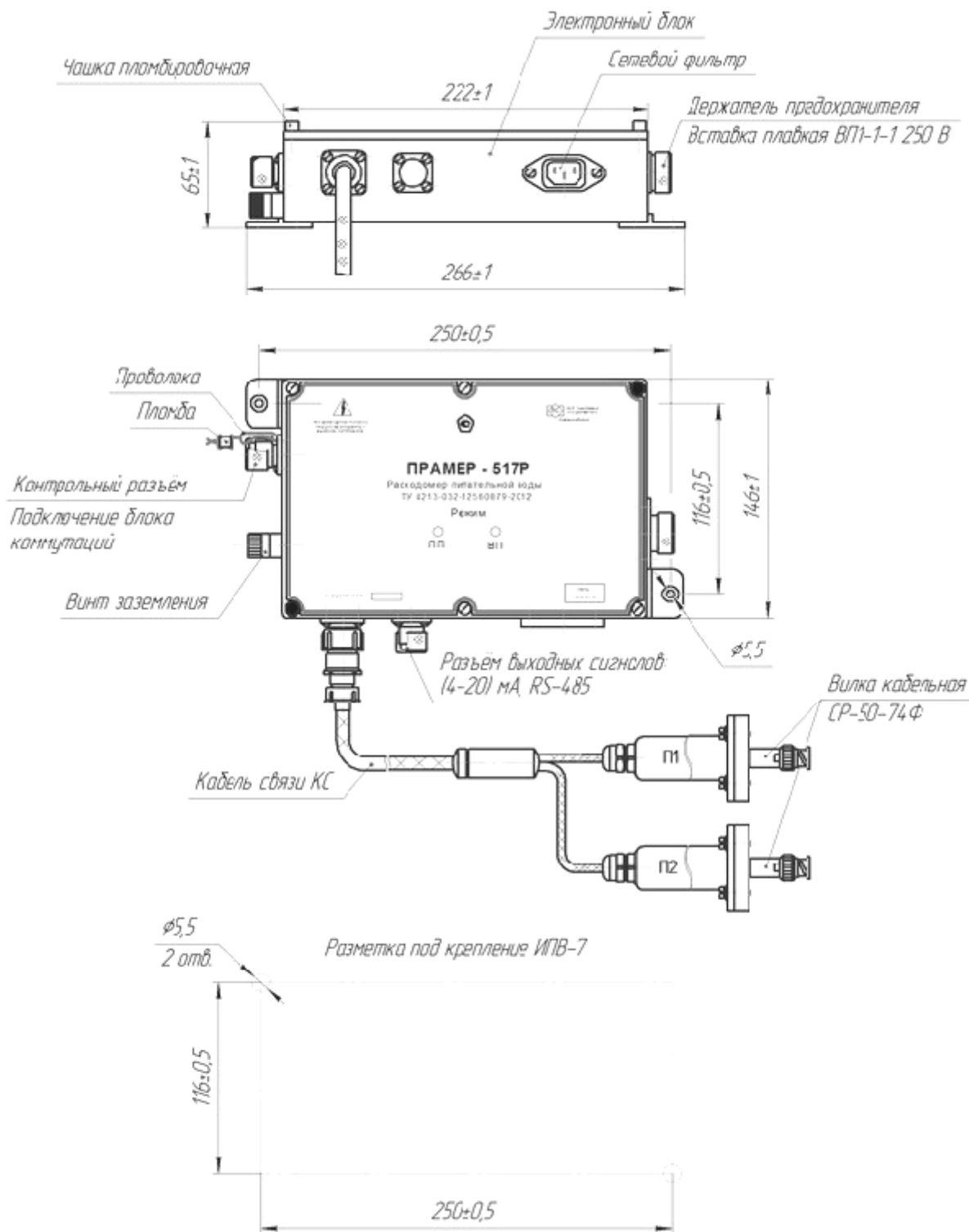
В рамках требований был подготовлен и согласован с заказчиком план качества, который включает все этапы производства и приемки изготовленной продукции.

Заказчиком была назначена уполномоченная организация, обеспечивающая проведение контроля качества (оценка соответствия в форме приемки), которая на основании анализа состояния конструкторской документации и состояния предприятия-изготовителя (оборудование, обученный персонал, технологии) выдавала разрешение на начало изготовления продукции.

Поставщики и материалы подвергались контролю с точки зрения наличия сертификационных документов, разрешающих использование материалов в изделиях для АЭС.

Была разработана и аттестована в Ростехнадзоре технология сварки элементов корпуса расходомера, а также согласовано использование методов контроля качества швов.

В соответствии с требованиями, был изготовлен головной образец расходомера, который подвергся приемочным испытаниям с участием уполномоченной организации и представителей заказчика.



**Рис. 5. Габаритно-присоединительные размеры и внешний вид вторичного прибора расходомера.**

Ну и наконец, проводился всесторонний поэтапный выходной контроль и приемка всей партии расходомеров. В качестве иллюстрации на рисунках 6 а) и б) приведены таблицы контроля из комплекта конструкторской документации.



Идентификационный номер	Идентификационный номер	Классификационный номер	Наименование		Наименование операции												Длительность операции, мин	Штук																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
			Имя изделия	Имя материала	Идентификационный номер																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	





**Рис. 7. Расходомер «ПРАМЕР-517Р»**

#### **Метрологические вопросы.**

Разрабатываемые расходомеры имеют две отличительные особенности:

- теплофизические параметры измеряемой воды: наибольшая температура составляет 260 °С, наибольшее давление – 18 МПа (180 кгс/см<sup>2</sup>);
- практическая невозможность демонтажа первичного преобразователя для периодической поверки (присоединение на месте эксплуатации - на сварке силовым).

С учетом максимального измеряемого расхода воды 500 куб.м/ч и указанных особенностей не существует возможности градуировать и поверять расходомер на известных горячеводных стендах. Поэтому за основу взят подход, который включает в себя следующие шаги.

Градуировка и поверка расходомеров на поверочной установке соответствующего класса с температурой воды 25±5 °С, экспериментальное определение поправочных коэффициентов для приведения измеренных значений расхода к рабочим параметрам среды, разработка метода и аппаратуры для имитационного способа поверки на месте эксплуатации.

В рабочем диапазоне расходов установлены следующие режимы функционирования расходомера:

- с рабочей температурой среды  $T_{\text{раб.1}} = 260 \text{ }^\circ\text{C}$  (533 К) и рабочим давлением  $P_{\text{раб.1}} = 17,9 \text{ МПа}$ ;
- с рабочей температурой среды  $T_{\text{раб.2}} = 160 \text{ }^\circ\text{C}$  (433 К) и рабочим давлением  $P_{\text{раб.1}} = 17,9 \text{ МПа}$ ;

При проведении бездемонтажной поверки на АЭС гарантируется следующий режим:  
- остановленная циркуляция потока при полном заполнении проточной полости первичного преобразователя питательной водой с рабочей температурой в пределах от 145 до 160 °С (от 418 до 433 К) и рабочим давлением в пределах от 9,75 до 10,25 МПа.

При проведении первичной поверки и периодических поверок расходомеры имеют функцию автоматического определения рабочих режимов на основе анализа теплофизических величин:

- скорости звука в измеряемой среде;
- коэффициента расширения корпуса первичного преобразователя (обобщенный термобарический коэффициент).

При экспериментальных исследованиях выполнялись следующие работы:

- определение геометрических параметров первичных преобразователей расходомеров в соответствии с Методикой поверки 4213-032-12560879 МП;
- определение влияния движущейся воды на амплитуду и форму приемных ультразвуковых сигналов в рабочем диапазоне расходов;
- градуировка (по ГСССД 117-88) и определение относительной погрешности расходомера по функции измерения скорости звука при атмосферном давлении в диапазоне температур 0 – 90°С;
- градуировка и определение относительной погрешности расходомера при измерении расхода на холодной воде;
- определение влияния температуры и давления контролируемой среды на амплитуду и форму приемных ультразвуковых сигналов;
- определение температуры области волновода в месте присоединения к нему пьезоэлектрического преобразователя при рабочих параметрах расходомера;
- определение влияния температуры и давления на изменение относительной погрешности расходомера при имитации расхода в рабочих условиях;
- определение термобарических коэффициентов для теплофизических параметров воды при рабочих параметрах.

В процессе термобарических исследований, поочередно каждый из образцов первичного преобразователя расходомера с установленными фланцами-заглушками, предварительно заполненный дистиллированной водой, помещали в полость термобарического стенда. Стенд обеспечивал задание требуемых значений давления и температуры внутри корпуса первичного преобразователя. При этом расходомер работал в штатном режиме на нулевом расходе и фиксировал все необходимые параметры при изменении давления и температуры воды внутри расходомера. Так же контролировали температуру корпусов пьезопреобразователей с целью подтверждения эффективности работы волноводов и радиаторов.

В результате экспериментов установлено, что на амплитуду приемных ультразвуковых сигналов не оказывает существенного воздействия:

- движение измеряемой среды до осредненных скоростей 5,06 м/с;
- термобарическое воздействие в рабочем диапазоне от (20°С; 0,1МПа) до (260°С; 18МПа).

Измеренные значения скорости звука при повышенных температурах и давлениях близки к величинам, приведенным в литературных источниках и ГСССД 117-88. Абсолютная погрешность измерения скорости звука расходомером в диапазоне температур от 20 до 90°С не превышает  $\pm 0,8$  м/с, пределы относительной погрешности измерения  $\pm 0,05\%$ .

Экспериментально определенные значения изменения скорости звука в рабочих режимах среды позволяет расходомеру автоматически распознавать рабочую область и учитывать в формуле соответствующие термобарические коэффициенты.

Поверка расходомера на водяном стенде подтвердила метрологические характеристики, оговоренные в Технических Требованиях заказчика.

Фактическая температура в области акустического контакта в точке наибольших значений теплофизических параметров среды (260°C, 18 МПа) не превышала 55,5 °С, что существенно ниже расчетной температуры.

Поверка имитационным способом на трех образцах расходомера в пяти точках воздействующих термобарических параметров на имитируемых расходах 35, 100, 200, 270, 315 и 360 м<sup>3</sup>/ч показала:

- относительная погрешность при имитационной поверке не превышает  $\pm 0,06$  %;
- экспериментально подтверждена возможность проведения поверки на неподвижной среде при температуре 150 °С и давлении 10,0 МПа.

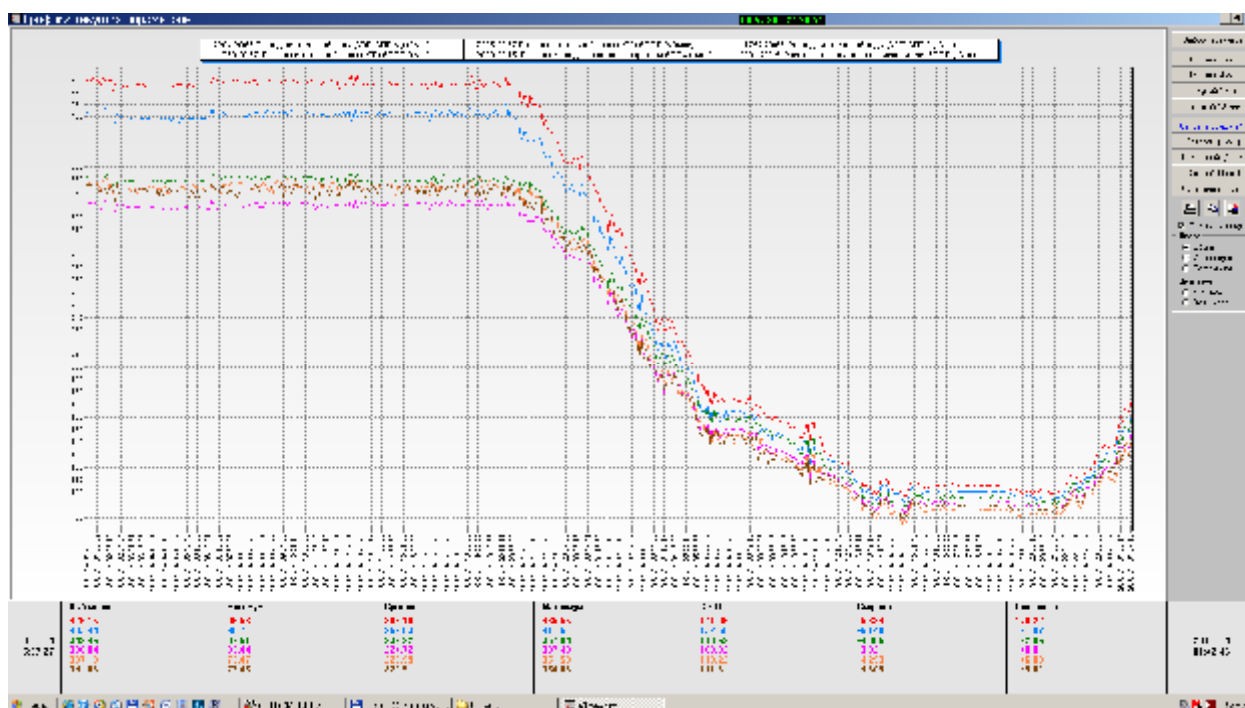
Положительные результаты расчетно-экспериментальной работы легли в основу документов для проведения государственных испытаний расходомера с целью утверждения типа средства измерения. Свидетельство о внесении типа средства измерения в государственный реестр получено.

### **Некоторые результаты внедрения.**

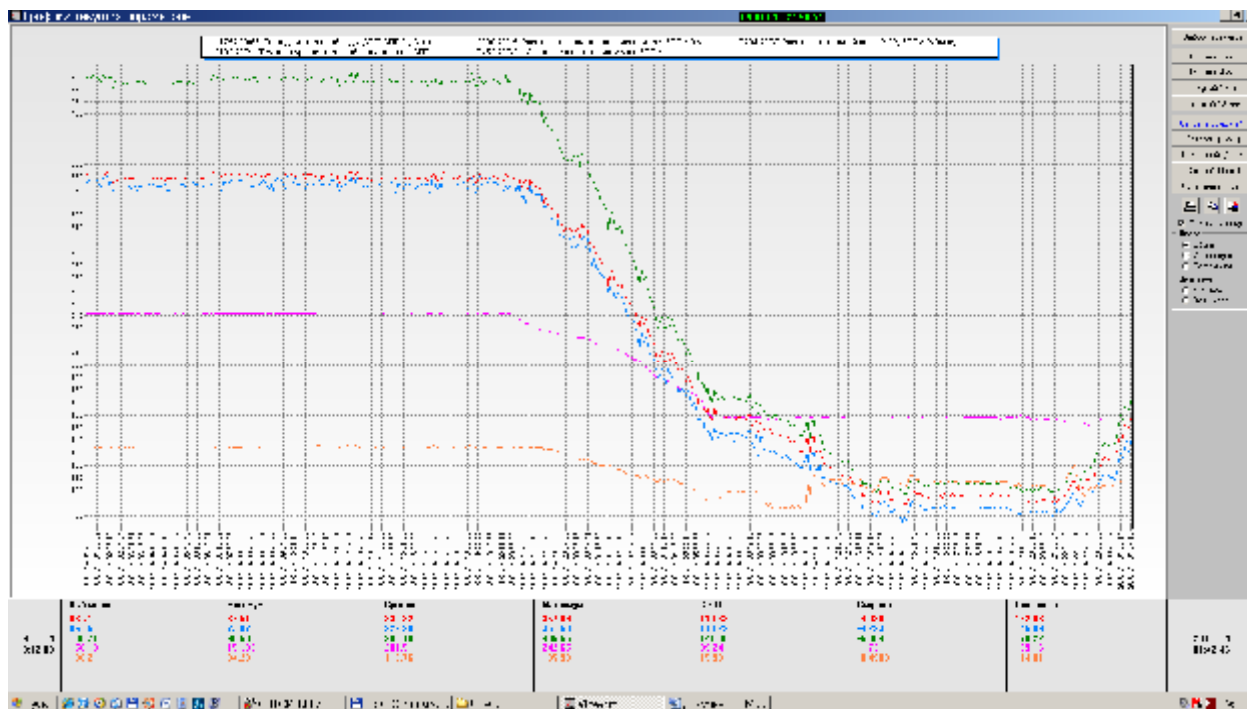
В настоящее время (март 2014 года) идет процесс поэтапного внедрения в эксплуатацию поставленных расходомеров, 2 из 6 отработали около года без замечаний, остальные планируется смонтировать во 2 квартале 2014 года.

По двум смонтированным расходомерам проведены пуско-наладочные работы, они введены в эксплуатацию и наряду со штатными средствами измерения расхода питательной воды (стандартные шайбы) используются для измерения расхода питательной воды одной из секций парогенератора. Расходомеры питательной воды «ПРАМЕР- 517Р» подтвердили свою прочность и плотность при рабочих параметрах среды, эффективность температурных развязок обеспечила ограничение температуры пьезопреобразователей на нужном уровне.

В качестве примера (рисунки 8, 9) можно привести записи показаний расходомеров «ПРАМЕР- 517Р» и штатных расходомеров третьего контура при номинальных и переходных режимах, когда температура и давление питательной воды изменялись.



**Рис. 8. Запись показаний расходомеров «Прамер 517Р» и штатных расходомеров.**



**Рис. 9. Запись показаний расходомеров «Прамер-517Р», штатных расходомеров, значений давления и температуры в переходном режиме.**

**Заключение.**

Впервые в России разработан ультразвуковой расходомер питательной воды высокой точности теплофикационного контура АЭС, предназначенный для работы на измеряемой среде с параметрами: температура – до 260°C, давление – до 18МПа.

Диаметр условного прохода измерительного канала расходомера – 200 мм.

Диапазон измеряемых расходов: от 20 м<sup>3</sup>/ч до 500 м<sup>3</sup>/ч с погрешностью ±0,5% (от 270 до 500 м<sup>3</sup>/ч) и ±1% (от 20 до 270 м<sup>3</sup>/ч).

Класс безопасности по ОПБ-88/97 – ЗНЗ.

Изготовлена партия расходомеров и сдана заказчику.

В настоящее время идет поэтапное внедрение на БАЭС и эксплуатация расходомеров в штатном режиме.

**Литература:**

1. Технические условия ТУ 4213-032-12560879-2012.
2. Руководство по эксплуатации «Расходомеры питательной воды ПРАМЕР-517Р» 4213 – 032-12560879 РЭ.

**Ещенко Сергей Николаевич,**  
 к.т.н., технический директор ЗАО «ПромСервис»,  
**Пиядов Олег Геннадьевич,**  
 заместитель технического директора ЗАО «ПромСервис»,  
**Ефремов Алексей Юрьевич,**  
 начальник ПТО ЗАО «ПромСервис».  
 ЗАО «Промсервис», РФ, 433502, Ульяновская обл.,  
 г. Димитровград, ул. 50 лет Октября, д. 112.  
 тел./факс: (84235) 4-18-07, 4-58-32, 6-69-26  
 E-mail: [promservis@promservis.ru](mailto:promservis@promservis.ru)  
[www.promservis.ru](http://www.promservis.ru).